

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
12 septembre 2003 (12.09.2003)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 03/075283 A2

(51) Classification internationale des brevets⁷ : G21C 7/20

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : FRAM-
ATOME ANP [FR/FR]; Tour Framatome, 1, place la
Coupole, F-92400 COURBEVOIE (FR).

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR03/00608

(22) Date de dépôt international :
25 février 2003 (25.02.2003)

(72) Inventeurs; et
(75) Inventeurs/Déposants (pour US seulement) : CAL-
LENS, Catherine [FR/FR]; 11, rue Hector Berlioz,
F-69009 LYON (FR). SEGURA, Hélène [FR/FR]; 2,
impasse Belloeuf, F-69003 LYON (FR).

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

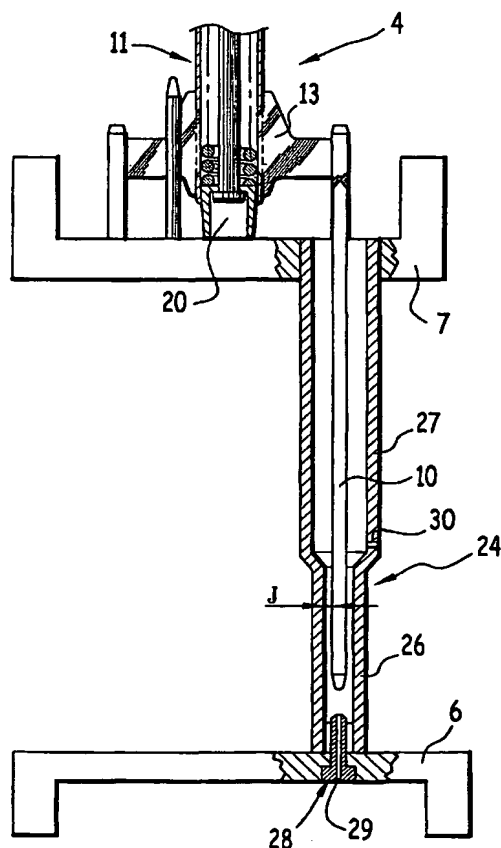
(30) Données relatives à la priorité :
02/02660 1 mars 2002 (01.03.2002) FR

(74) Mandataires : DOMENEGO, Bertrand etc.; CABINET
LAVOIX, 2, place d'Estienne d'Orves, F-75441 PARIS
CEDEX 09 (FR).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD FOR DESIGNING A NUCLEAR FUEL ASSEMBLY WITH DAMPING GUIDE TUBE, CORRESPOND-
ING SYSTEM, COMPUTER PROGRAMME AND SUPPORT

(54) Titre : PROCEDE DE CONCEPTION D'UN ASSEMBLAGE DE COMBUSTIBLE NUCLEAIRE A TUBE GUIDE AMOR-
TISSEUR, SYSTEME, PROGRAMME D'ORDINATEUR ET SUPPORT CORRESPONDANTS



(57) Abstract: The invention concerns a method comprising the following steps: determining the falling speed of a control pencil (10) at the entrance of a lower damping section (26) of a guide tube during the fall of the bundle controlling (4) a fuel assembly in case of an emergency shutdown of the nuclear reactor; determining, based on the falling speed determined at step a), the evolution of the falling speed of the control pencil (10) in the lower damping section; determining, based on the evolution of the speed determined at step b), a maximum excess pressure generated in the liquid contained in the lower section (26); and determining, based on the maximum excess pressure determined at step c), a maximum circumferential stress generated in the lower section (26).

(57) Abrégé : Ce procédé comprend les étapes de :- détermination de la vitesse de chute d'un crayon de contrôle (10) à l'entrée d'un tronçon inférieur d'amortissement (26) d'un tube guide lors de la chute de la grappe de contrôle (4) d'un assemblage combustible en cas d'arrêt d'urgence du réacteur nucléaire, - détermination, à partir de la vitesse de chute déterminée à l'étape a), de l'évolution de la vitesse de chute du crayon de contrôle (10) dans le tronçon inférieur d'amortissement, - détermination, à partir de l'évolution de la vitesse déterminée à l'étape b), d'une surpression maximale créée dans le liquide contenu dans le tronçon inférieur (26), et - détermination, à partir de la surpression maximale déterminée à l'étape c), d'une contrainte radiale normale-circumférentielle maximale créée dans le tronçon inférieur (26).



(81) États désignés (*national*) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (*régional*) : brevet ARIPO (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), brevet eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), brevet européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI,

FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SI, SK, TR), brevet OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— *sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport*

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

Procédé de conception d'un assemblage de combustible nucléaire à tube guide amortisseur, système, programme d'ordinateur et support correspondants.

La présente invention concerne un procédé de conception d'un assemblage de combustible nucléaire destiné à être placé dans un réacteur nucléaire, l'assemblage comprenant plusieurs tubes guides, et une grappe de contrôle comprenant elle-même plusieurs crayons de contrôle et un support de
5 crayons de contrôle, les crayons de contrôle et les tubes guides s'étendant parallèlement à une direction longitudinale, chaque crayon de contrôle étant reçu dans un tube guide pour former des paires tubes guides/crayons de contrôle, chaque tube guide comprenant un tronçon inférieur d'amortissement comprenant
10 au moins une partie de diamètre intérieur réduit destinée à contenir un fluide pour amortir la chute du crayon de contrôle reçu dans ledit tube guide, la partie de diamètre intérieur réduit entourant le crayon de contrôle avec un jeu radial de passage lors de la pénétration du crayon de contrôle dans le tube guide.

On conçoit que les assemblages de combustibles nucléaires doivent être fiables pour permettre un fonctionnement sûr des réacteurs nucléaires.

15 Ainsi, des règles de conception et de construction de tels assemblages ont été établies.

Ces règles imposent un cadre général et des critères minimaux que les constructeurs d'assemblages doivent prendre en compte.

Pour ce qui concerne les tubes guides, les règles de conception
20 imposent de vérifier qu'ils restent stables sous compression axiale et que leur intégrité mécanique n'est pas atteinte lors d'une telle compression. Ces critères visent en particulier à prendre en compte la compression axiale des tubes guides résultant de l'appui sur la plaque supérieure du cœur de ressorts portés par un embout supérieur de l'assemblage.

25 Si les critères imposés par les règles de conception permettent de concevoir des assemblages de fiabilité satisfaisante, il ne s'agit cependant que de critères minimaux et il est souhaitable de mettre au point un procédé permettant de concevoir des assemblages encore plus fiables.

Pour autant, il est également souhaitable de réduire les marges de
30 sécurité lors de la conception afin de réduire la masse et le coût des assemblages construits.

Un but de l'invention est de résoudre ce problème en fournissant un procédé permettant de concevoir des assemblages de combustibles nucléaires plus fiables tout en limitant les marges de conception.

A cet effet, l'invention a pour objet un procédé de conception d'un assemblage de combustible nucléaire destiné à être placé dans un réacteur nucléaire, l'assemblage comprenant plusieurs tubes guides, et une grappe de contrôle comprenant elle-même plusieurs crayons de contrôle et un support de
5 crayons de contrôle, les crayons de contrôle et les tubes guides s'étendant parallèlement à une direction longitudinale, chaque crayon de contrôle étant reçu dans un tube guide pour former des paires tubes guides/crayons de contrôle, chaque tube guide comprenant un tronçon inférieur d'amortissement comprenant
10 au moins une partie de diamètre intérieur réduit destinée à contenir un fluide pour amortir la chute du crayon de contrôle reçu dans ledit tube guide, la partie de diamètre intérieur réduit entourant le crayon de contrôle avec un jeu radial de passage lors de la pénétration du crayon de contrôle dans le tube guide, caractérisé en ce que le procédé comprend, pour au moins une paire tube guide/crayon de contrôle, les étapes de :

15 a) détermination de la vitesse de chute du crayon de contrôle à l'entrée du tronçon inférieur d'amortissement lors de la chute de la grappe de contrôle en cas d'arrêt du réacteur nucléaire,

b) détermination, à partir de la vitesse de chute déterminée à l'étape a), de l'évolution de la vitesse de chute du crayon de contrôle dans le tronçon
20 inférieur d'amortissement,

c) détermination, à partir de l'évolution de la vitesse déterminée à l'étape b), d'une surpression maximale créée dans le liquide contenu dans le tronçon inférieur d'amortissement, et

d) détermination, à partir de la surpression maximale déterminée à
25 l'étape c), d'une contrainte circonférentielle maximale créée dans le tronçon inférieur d'amortissement.

Selon des modes particuliers de réalisation, le procédé peut comprendre l'une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, prise(s) isolément ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles :

30 - le procédé comprend en outre une étape de vérification, en utilisant la contrainte circonférentielle maximale déterminée à l'étape d), qu'une contrainte maximale admissible par le tube guide n'a pas été dépassée,

- l'étape de détermination b) est assurée en utilisant une valeur supérieure de jeu radial de passage, et l'étape de détermination c) est assurée
35 en utilisant une valeur inférieure de jeu radial de passage,

- la valeur supérieure est une valeur maximale statistique du jeu de passage,

- la valeur inférieure est une valeur minimale statistique du jeu de passage,

5 - le support de la grappe de contrôle comprenant un ressort hélicoïdal d'amortissement de l'impact du support contre un embout supérieur de l'assemblage en cas de chute de la grappe de contrôle lors d'un arrêt du réacteur nucléaire, le procédé comprend en outre les étapes de :

10 e) détermination de l'évolution de la vitesse de la grappe de contrôle après impact du support contre l'embout supérieur,

f) détermination, à partir de l'évolution de la vitesse déterminée à l'étape e), d'un effort longitudinal maximal de compression du ressort, et

15 g) détermination, à partir de l'effort maximal longitudinal de compression, d'au moins une contrainte maximale de cisaillement dans le ressort,

- une contrainte maximale de cisaillement est une contrainte de cisaillement le long de la fibre neutre du ressort,

20 - une contrainte maximale de cisaillement est une contrainte de cisaillement le long de la fibre du ressort la plus proche de son axe central longitudinal,

- le procédé comprend en outre une étape de vérification, en utilisant une contrainte maximale de cisaillement déterminée à l'étape g), qu'une contrainte maximale admissible par le ressort n'a pas été dépassée.

25 L'invention a en outre pour objet un système de conception d'un assemblage de combustible nucléaire, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de mise en œuvre des étapes d'un procédé tel que défini précédemment.

30 Selon une variante, le système comprend un ordinateur et des moyens de stockage dans lesquels est stocké au moins un programme comprenant des instructions pour l'exécution d'étapes du procédé de conception d'un assemble de combustible nucléaire.

L'invention a en outre pour objet un programme d'ordinateur comprenant des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé tel que défini précédemment.

L'invention a également pour objet un support utilisable dans un ordinateur et sur lequel est enregistré un programme tel que défini précédemment.

L'invention sera mieux comprise à la lecture de la description qui va suivre, donnée uniquement à titre d'exemple, et faite en se référant aux dessins annexés sur lesquels :

- la figure 1 est une vue schématique en perspective avec arrachements d'un assemblage de combustible nucléaire conçu par un procédé selon l'invention ;
- 10 - la figure 2 est une vue schématique latérale agrandie et partiellement en coupe, illustrant la structure de l'araignée de l'assemblage de la figure 1,
- la figure 3 est une vue partielle schématique en élévation latérale de l'assemblage de la figure 1 et illustrant plus particulièrement une paire tube guide/crayon de contrôle,
- 15 - la figure 4 est un schéma bloc illustrant le système de conception de l'assemblage de la figure 1,
- la figure 5 est un organigramme illustrant des étapes successives du procédé de conception mis en œuvre par le système de la figure 4,
- la figure 6 représente une courbe d'évolution de la vitesse de chute d'un crayon de contrôle avant pénétration dans le tronçon inférieur du tube guide correspondant, cette évolution étant calculée par le système de la figure 4, et
- 20 - la figure 7 représente une courbe d'évolution de la vitesse de chute du même crayon de contrôle dans le tronçon inférieur du tube guide correspondant, cette évolution étant calculée par le système de la figure 4.
- 25 La figure 1 représente un assemblage 1 de combustible nucléaire qui comprend principalement un réseau 2 à base carrée de crayons 3 de combustible nucléaire et une grappe de contrôle 4.

L'assemblage 1 comprend des grilles 5 de maintien des crayons 3 qui sont réparties sur la hauteur des crayons 3. Un embout inférieur 6 est disposé sous les extrémités inférieures des crayons 3 et un embout supérieur 7 au-dessus des extrémités supérieures des crayons 3. L'embout supérieur 7 est muni de ressorts 8 d'appui sur la plaque supérieure du cœur du réacteur dans lequel l'assemblage 1 est destiné à être chargé.

La grappe de contrôle 4 comprend plusieurs crayons de contrôle 10, par exemple vingt quatre. Classiquement, les crayons de contrôle 10 comprennent un matériau absorbant les neutrons.

Les crayons 3 et 10 s'étendent parallèlement à une direction longitudinale L verticale.

Les crayons 10 sont portés à leurs extrémités supérieures par un support 11 généralement dénommé araignée.

Comme illustré plus particulièrement par la figure 2, l'araignée 11 comprend un pommeau central vertical 12 et une série de bras ou ailettes 13 qui s'étendent radialement vers l'extérieur depuis l'extrémité inférieure du pommeau 12 jusqu'à leurs extrémités radialement extérieures 14.

Chaque crayon de contrôle 10 est relié par son extrémité supérieure à un bras 13.

Le pommeau 12 de l'araignée 11 possède un alésage central borgne 15 débouchant vers le bas et dans lequel un ressort 16 hélicoïdal d'amortissement est logé. Le ressort 16 s'étend verticalement le long d'un axe central A. Une vis 17 de tension s'étend sensiblement sur toute la hauteur de l'alésage 15 et est vissée dans la paroi 18 délimitant la partie supérieure de l'alésage 15.

La partie inférieure de la vis 17 traverse le fond d'une bague de retenue 20 qui prend appui sur l'extrémité inférieure du ressort 16. La tête 21 de la vis 17 s'appuie vers le haut contre le fond de la bague de retenue 20 pour plaquer le ressort 16 contre la paroi 18 du pommeau 12.

Comme illustré par la figure 3 pour un crayon de contrôle 10, chaque crayon de contrôle 10 est reçu dans un tube guide 24 respectif disposé dans le réseau 2 de crayons 3 combustible. Ainsi, vingt quatre paires tube guide/crayon de contrôle sont formées. Chacune de ces paires ayant une structure analogue, une seule sera décrite dans ce qui suit.

Le tube guide 24 s'étend depuis l'embout inférieur 6 jusqu'à l'embout supérieur 7. Le tube guide 24 comprend un tronçon inférieur 26 de diamètre intérieur réduit et un tronçon supérieur 27. Le tronçon inférieur 26 est relié à l'embout inférieur 6 par une vis épaulée 28 percée d'un alésage vertical 29 traversant.

Le tronçon inférieur 26 du tube guide 24 entoure le crayon de contrôle 10 avec un jeu radial J de passage.

Le tronçon supérieur 27 est fixé à l'embout supérieur 7 et débouche à l'extérieur de l'assemblage 1.

Des orifices latéraux 30, dont un seul est visible sur la figure 4, sont ménagés dans le tronçon supérieur 27 à proximité du tronçon inférieur 26.

Lorsque l'assemblage 1 est chargé dans un réacteur nucléaire, le liquide de refroidissement du réacteur remplit l'intérieur du tube guide 24.

De manière classique, la grappe de contrôle 4 est mobile verticalement par rapport au reste de l'assemblage 1 pour permettre le réglage

de la réactivité pendant le fonctionnement normal du réacteur, et donc les variations de puissance depuis la puissance nulle jusqu'à la pleine charge en fonction de l'enfoncement vertical des crayons de contrôle 10 dans le réseau 2 de crayons 3. Le déplacement vertical de la grappe de contrôle 24 est classiquement assuré via une tige de commande reliée à l'extrémité supérieure du pommeau 12.

Lors d'un arrêt du réacteur, la tige de commande et la grappe 4 chutent par gravité.

Au début de ce mouvement de chute les crayons de contrôle 10 ne sont guidés que par les tronçons supérieurs 27 des tubes guides 24 et n'ont pas encore atteint les tronçons inférieurs 26.

En fin de chute, les extrémités inférieures des crayons de contrôle 10 pénètrent dans les tronçons inférieurs 26. Le fluide de refroidissement contenu dans les tronçons 26 en est alors violemment chassé d'une part vers le haut et d'autre part vers le bas via les orifices 29 des vis épaulées 28.

Chaque tronçon inférieur 26 se comporte alors comme un amortisseur hydraulique freinant le mouvement de chute du crayon de contrôle 10 correspondant et donc de la grappe 4.

Cette phase de freinage se termine en fin de course par l'impact de l'araignée 11 sur l'embout supérieur 7 de l'assemblage 1.

Cet impact s'effectue par l'intermédiaire de la bague de retenue 20. Au cours de cet impact, le ressort 16 est comprimé verticalement pour amortir le choc.

Selon l'invention, l'assemblage 1 a été conçu pour prendre en compte des contraintes particulières provoquées dans l'assemblage par la chute de la grappe de contrôle 4 lors d'un tel arrêt du réacteur.

Ainsi, pour concevoir l'assemblage 1, on a utilisé notamment un système informatique 32 tel que représenté schématiquement sur la figure 4.

Ce système 32 comprend par exemple un ordinateur ou unité de traitement d'informations 34 comprenant un ou plusieurs processeurs, des moyens 36 de stockage, des moyens 38 d'entrée/sortie et éventuellement des moyens 40 d'affichage.

Des instructions exécutables par l'ordinateur 34 sont stockées sous la forme d'un ou plusieurs programmes dans les moyens 36 de stockage.

Ces instructions sont par exemple des instructions en code de programmation FORTRAN.

Ces différentes instructions, lorsqu'elles sont exécutées par l'ordinateur 34, permettent la mise en œuvre du procédé illustré par l'organigramme de la figure 5.

Dans une première étape illustrée par le bloc 42 de cette figure, l'ordinateur 34 calcule, à partir de données 43, l'évolution de la vitesse de chute d'un crayon de contrôle 10 dans le tronçon supérieur 27 du tube guide 24 correspondant en cas d'arrêt du réacteur .

Ce calcul peut être effectué en supposant, par exemple, que le crayon de contrôle 10 est soumis tout d'abord à des efforts constants :

- 10 - effort de gravité : $fg = Mg$,
- poussée d'Archimède : $fa = - \rho gV$,
- différence de pression dans le cœur : fc , et
- frottements mécaniques : fm ,

où M et V sont respectivement la masse et le volume de la grappe 4 et de sa tige de commande.

Le crayon de contrôle 10 est également soumis à des efforts fonction de sa vitesse ou de sa position, par exemple des frottements hydrauliques que l'on peut supposer de la forme : $fh = -c1 (M + \rho V) v^2$ avec v = vitesse de la grappe 4 et donc du crayon 10 considéré.

20 Ainsi, l'équation du mouvement du crayon dans le tronçon supérieur 27 du tube guide 24 s'écrit :

$$(M + \rho V) \frac{dv}{dt} = \Sigma f$$

On obtient donc :

$$\frac{dv}{dt} = c2 - c1 v^2$$

25 avec $c1$ = frottements hydrauliques dans le tube guide, et

$$c2 = \frac{fg + fa + fc + fm}{M + \rho V}.$$

$C1$ et $c2$ sont par exemple des données expérimentales mesurées lors d'essais de chute de grappe de contrôle 4. Ces données sont, avec les autres données nécessaires au calcul telles que la masse et le volume de la grappe 4 et de sa tige de commande, introduites par exemple sous forme d'un fichier 43 grâce aux moyens 38 d'entrée/sortie.

L'ordinateur 34 résout l'équation du mouvement du crayon de contrôle 10 par exemple grâce à la méthode de NEWTON.

35 Ainsi on connaît l'évolution de la vitesse du crayon de contrôle 10 dans le tronçon supérieur 27 en fonction du temps. Le profil ainsi déterminé peut être affiché sous forme d'une courbe par les moyens 40 d'affichage. Cette courbe est illustrée par la figure 6.

Ainsi, à l'issue de l'étape illustrée par le bloc 42, on connaît la vitesse du crayon de contrôle 10 à l'entrée du tronçon inférieur d'amortissement 26 du tube guide 24.

A partir des résultats de l'étape du bloc 42, l'ordinateur 34 calcule l'évolution de la vitesse du crayon de contrôle 10 lors de sa chute dans le tronçon inférieur d'amortissement 26.

Cette étape est schématisée par le bloc 44.

Cette étape peut être effectuée en utilisant l'équation :

$$- \frac{dv}{dt} = c2 - \left(c1 + \frac{SCA \times NCA \Delta P}{M + \rho V} \frac{1}{v^2} \right) v^2$$

avec $c2 = \frac{fg + fa}{M + \rho V} - \frac{M - \rho V}{M + \rho V} g$

SCA = section du crayon 10, et

NCA = nombre de crayons 10 dans la grappe 4.

On fait donc ici l'hypothèse que f_c et f_m sont négligeables.

La différence ΔP représente la surpression créée dans le liquide de refroidissement contenu dans le tube guide 24, c'est à dire sa pression entre l'extrémité inférieure du crayon 10 et la pression régnant dans le tronçon supérieur 27 du tube guide 24.

ΔP peut être déterminée par la formule :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho Q^2 v^2 (EXPA + CONTRA + FECCR \times CISA \times z)$$

où $EXPA = \left(\frac{SCA}{SACM} \left(1 - \frac{SACM}{SACTG} \right) \right)^2$

avec SM = section du tronçon inférieur 26,

SACM = SM - SCA = section de l'espace annulaire entre le crayon 10 et le tronçon inférieur 26,

SACTG = STG - SCA où STG est la section du tronçon supérieur 27 du tube guide 24,

$$CONTRA = 0,4 \left(1 - \frac{SACM}{SM} \right) \left(\frac{SCA}{SACM} \right)^2,$$

FECCR = coefficient de perte de charge par frottement dans le tronçon inférieur 26,

$$CISA = \left(\frac{SCA}{SM} \right)^2 \frac{1}{DM},$$

DM = diamètre moyen du tube guide 24 dans le tronçon supérieur 27,

z = hauteur du crayon 10 insérée dans le tronçon inférieur 26 du tube guide 24, et

Q = fraction du liquide s'écoulant vers le haut hors du tronçon inférieur 26.

La résolution des équations régissant le mouvement du crayon 10 après pénétration du tronçon inférieur 26 est assurée par l'ordinateur 34, par exemple en utilisant la méthode de RUNGE-KUTTA.

Ainsi, on connaît à l'issue de l'étape 44 l'évolution de la vitesse du crayon de contrôle 10 dans le tronçon inférieur 26 du tube guide 24 avant impact de l'araignée 11 sur l'embout supérieur 7.

Le profil de vitesse ainsi déterminé peut être par exemple affiché par les moyens 40 comme illustré par la figure 7. Sur la courbe de cette figure 7, le profil de vitesse déterminé lors de l'étape 44 est le tronçon situé à gauche du point 45.

L'ordinateur 34 assure ensuite, dans l'étape du bloc 46, le calcul de la surpression maximale créée ΔP_{MAX} .

Ce calcul peut être assuré par exemple à partir de la formule :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho Q^2 v^2 (EXPA + CONTRA + FECDx CISA_{xz})$$

L'ordinateur 34 assure dans l'étape du bloc 48 le calcul d'une contrainte circonférentielle et normale maximale $\sigma_{\theta MAX}$ à laquelle le tronçon inférieur 26 du tube guide 24 est soumis du fait de la surpression maximale ΔP_{MAX} .

Cette contrainte peut être calculée à partir de la formule :

$$\sigma_{\theta MAX} = \frac{1}{2} \Delta P_{MAX} \left(\frac{DPM}{EMP} + 1 \right)$$

où DPM = diamètre intérieur du tronçon inférieur 26, et

EMP = épaisseur minimale de la paroi du tronçon inférieur 26.

Le système 32 peut alors fournir, grâce aux moyens 38 d'entrée / sortie, un premier résultat sous forme d'un fichier 49 contenant la valeur $\sigma_{\theta MAX}$ déterminée, et éventuellement la surpression maximale ΔP_{max} déterminée.

Ensuite, le système 32 assure le calcul de l'évolution de la vitesse du crayon de contrôle 10 après entrée en contact de l'araignée 11 et de l'embout supérieur 7.

Cette étape de calcul est illustrée par le bloc 50 sur la figure 5.

Ce calcul peut être, par exemple, assuré en utilisant l'équation suivante lorsque la bague 20, et donc l'araignée 11, est en appui sur l'embout supérieur 7 :

$$(M + \rho V) \frac{dv}{dt} = (M - \rho V) g - PRCH - K (z - LAI) - c_3 v$$

avec PRCH = précharge du ressort 16 = PRCMP x K où PRCMP est la précompression du ressort 16 et K la raideur du ressort 16,

LAI = longueur parcouru par le crayon de contrôle dans le tronçon inférieur 26 avant impact

c3 = coefficient d'amortissement hydraulique pour modéliser l'amortissement dans le tronçon inférieur 26.

Dans le cas d'un rebond, c'est-à-dire lorsque l'araignée 11 n'est plus en contact avec l'embout supérieur 7, l'équation de mouvement du crayon de
5 contrôle 10 considéré s'écrit :

$$(M + \rho V) \frac{dv}{dt} = (M - \rho V) g - c3 v$$

Ces deux équations sont intégrées par l'ordinateur 34, par exemple en utilisant la méthode de RUNGE-KUTTA.

L'étape 50 permet donc de connaître la cinématique de la grappe de
10 contrôle 4 lors de l'amortissement mécanique du choc par le ressort 16. Le profil de vitesse ainsi déterminée peut être par exemple affiché par les moyens 40. Ce profil correspond au tronçon situé à droite du point 45 sur la courbe de la figure 7.

A partir des résultats de cette étape, le système 32 assure dans l'étape 52 le calcul d'une force verticale de compression maximale F_{MAX} à laquelle le ressort
15 16 est soumis lors de l'amortissement mécanique.

Ce calcul peut être assuré, par exemple, à partir de la formule :

$$F_{MAX} = \max \{K(z-LAI) + PRCH\}$$

Le système 32 assure alors dans l'étape du bloc 54 le calcul d'une contrainte maximale de cisaillement approchée τ_{MAX} dans le ressort 16 :

$$20 \quad \tau_{MAX} = \frac{8F_{MAX}DFN}{\pi DFR^3}$$

avec $DFN = DER - DFR$, et

DER = diamètre extérieur du ressort 16,

DFR = diamètre du fil du ressort 16.

Ensuite, le système 32 peut éventuellement assurer à partir de la
25 contrainte maximale τ_{max} , le calcul de contraintes maximales corrigées.

Ces contraintes peuvent être calculées en multipliant τ_{max} par différents facteurs.

Ainsi on peut calculer :

$$\begin{aligned} 30 \quad \tau_{MAX1} &= \tau_{MAX} \times K_c, \text{ et} \\ \tau_{MAX2} &= \tau_{MAX} \times K, \\ \text{avec } K_c &= 1 + \frac{0.5}{C}, \\ C &= \frac{DFN}{DFR}, \text{ et} \\ K &= \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \end{aligned}$$

La contrainte τ_{MAX1} correspond à la contrainte de cisaillement le long de la
35 fibre neutre FN (fig. 2) du ressort 16. La contrainte τ_{MAX2} correspond à la

contrainte le long de la fibre F2 (fig. 2) du ressort 16 la plus proche de l'axe central vertical A du ressort 16 (voir figure 2).

Le système 32 fournit à l'issue de cette étape illustrée par le bloc 56 les différentes contraintes de cisaillement maximales calculées, par exemple sous
5 forme de données stockées dans un fichier 57 émis par les moyens 38 d'entrée/sortie.

A partir des données contenues dans les fichiers 49 et 57, qui ont également été stockés dans les moyens 36 de stockage, l'ordinateur 34 va vérifier que les contraintes maximales calculées sont bien acceptables pour les
10 matériaux constituant respectivement le tube guide 24 et le ressort hélicoïdal 16.

Cette étape a été schématisée par le bloc 58 sur la figure 5. Au cours d'une telle étape, le système 32 va par exemple vérifier que les contraintes de cisaillement maximales calculées au cours des étapes 54 et 56 sont inférieures à des valeurs maximales admissibles par le matériau constituant le ressort 16.
15 Cette vérification est assurée par comparaison de τ_{MAX} , τ_{MAX1} et τ_{MAX2} à une valeur maximale admissible par le matériau du ressort 16.

Pour ce qui concerne la contrainte maximale circonférentielle $\sigma_{\theta MAX}$, la vérification peut être assurée à partir d'une formule de la forme :

$$f(\sigma_{\theta MAX}) < \sigma_{\text{admissible}}$$

20 ou $\sigma_{\text{admissible}}$ se rapporte au matériau constituant les tronçons inférieurs 26 des tubes guides 24.

La fonction f peut être une fonction prenant en compte d'autres contraintes auxquelles les tubes guides 24 peuvent être soumis. Une telle contrainte peut être une contrainte verticale de compression σ_A auquel les tubes guides 24 sont
25 soumis lors de l'appui des ressorts 8 de l'embout supérieur 7 sur la plaque supérieure du cœur pour contrebalancer la poussée hydrostatique en fonctionnement.

Ainsi, la fonction f peut être, par exemple, de la forme $f(\sigma_{\theta MAX}, \sigma_A) = \sigma_{\theta MAX} + \sigma_A$,

30 On notera que cette dernière étape, illustrée par le bloc 58, peut être mise en œuvre par un logiciel séparé qui assure de manière générale la validation de différents paramètres de conception de l'assemblage 1 à partir de résultats fournis par divers logiciels dédiés chacun à la prise en compte de conditions particulières de fonctionnement et parmi lesquels figure(nt) le ou les logiciel(s)
35 assurant la mise en œuvre des étapes 42, 44, 46, 48, 50, 52, 54 et 56.

De manière générale, le fichier 43 comprenant les données 43 utilisées par le procédé pour les différents calculs peut comprendre les données du tableau 1 suivant.

5

diamètre extérieur crayon de contrôle 10	(m)	Nominal ; maximal
diamètre intérieur tronçon supérieur 27	(m)	Nominal ; maximal
diamètre intérieur tronçon inférieur 26	(m)	Nominal ; maximal
longueur totale tronçon inférieur 26,	(m)	
longueur d'amortissement avant impact	(m)	
épaisseur minimum paroi tronçon inférieur 26	(m)	
rugosité maximale crayon 10/ tube 24	(m)	Nominal ; tolérance
diamètre orifice 29	(m)	
longueur orifice 29	(m)	
rugosité orifice 29	(m)	
masse mobile M	(kg)	
masse volumique du liquide	(kg/m ³)	
viscosité cinématique du liquide	(m ² /s)	
c1	(/m)	
c2	(m/s ²)	
module de Young du tube guide 24	(Pa)	
coefficient de Poisson du tube guide 24		
précompression du ressort 16	(m)	
précharge du ressort 16	(N)	
longueur du ressort 16 avec les spires jointives	(m)	
diamètre extérieur du ressort 16	(m)	
diamètre du fil du ressort 16	(m)	
enfoncement lorsque le pommeau 12 est au contact de l'embout supérieur 7.	(m)	
FIN		

Tableau 1

De même le fichier 49 comprenant les résultats issus de l'étape 48 peut
 10 comprendre les données du tableau 2 ci-dessous.

ΔP_{MAX} : surpression maximale dans le tronçon inférieur 26	(Pa)
z_{MAX} : enfoncement correspondant dans le tronçon inférieur 26	(m)

σ_{9MAX} : contrainte maximale dans le tronçon inférieur 26	(Pa)
f_{max} : force maximale sur l'embout inférieur 6	(N)
t_{dur} : temps de chute dans le tronçon inférieur 26 avant impact	(s)
v_{fin} : vitesse d'impact de la grappe 4 sur l'embout supérieur 7	(m/s)

Tableau 2

Le fichier 57 comprenant les résultats de l'étape 56 peut quant à lui contenir les données du tableau 3 ci-dessous.

F_{MAX} : force de compression maximale sur le ressort 16	(N)
h_{MAX} : flèche maximale du ressort 16	(m)
τ_{MAX} : contrainte maximale approchée dans le ressort	(Pa)
τ_{MAX1} : contrainte maximale approchée corrigée par K_c	(Pa)
τ_{MAX2} : contrainte maximale approchée corrigée par K (facteur de Wahl)	(Pa)

Tableau 3

5

On a pu vérifier expérimentalement que les surpressions maximales et les contraintes maximales obtenues grâce aux étapes 42, 44, 46 et 48 étaient fiables. Ainsi, la première partie correspondante du procédé permet de concevoir des tubes guides 24 fiables. En outre, cette première partie ne calcule qu'une seule contrainte qui apparaît être la contrainte pertinente pour les conditions prises en compte. Par conséquent, cette première partie du procédé permet de limiter les marges de sécurité lors de la conception et donc de concevoir des assemblages relativement légers et économiques

La deuxième partie du procédé, qui correspond aux étapes 50, 52, 54 et 56, permet également de calculer des contraintes maximales de manière fiable, comme confirmé expérimentalement.

Ainsi, la deuxième partie du procédé permet d'atteindre par le calcul une conception fiable des ressorts 16 d'araignée ce qui s'avère avantageux par rapport à la seule méthode d'essais imposée jusqu'à présent par la réglementation. En effet, il apparaît que la deuxième partie du procédé ne calcule que les quelques contraintes, et notamment celles sur la fibre F2 du ressort 16 la plus proche de l'axe central A du ressort, qui s'avèrent pertinentes pour les conditions envisagées. Ainsi, la deuxième partie du procédé permet de réduire les marges de conception.

25

De manière plus générale les étapes 42, 44, 46 et 48 d'une part, et 50, 52, 54 et 56 d'autre part, peuvent être assurées par des logiciels distincts.

Afin d'accroître la fiabilité du calcul, on peut pour la mise en œuvre de la première partie du procédé, utiliser comme jeu de passage J la valeur nominale de ce jeu, ou cette valeur nominale corrigée par la tolérance de fabrication, ou une valeur résultant d'études statistiques de la dispersion des jeux de passages J obtenus dans des assemblages construits.

Dans une variante, on pourra utiliser une valeur de jeu J plus importante pour les étapes 42 et 44 et une valeur de jeu J plus faible pour les étapes 46 et 48. Cela permet de calculer une valeur de contrainte $\sigma_{\theta\text{MAX}}$ élevée, puisque la vitesse atteinte lors de la chute du crayon 10 considéré est élevée et le volume disponible dans le tronçon inférieur 26 pour le liquide lors de l'amortissement est faible. Toutefois, cette valeur élevée de contrainte n'est pas irréaliste et ne conduit donc pas à des marges de conception injustifiées, comme illustré par l'exemple suivant.

Selon une variante particulière, la valeur supérieure peut être une valeur maximale de jeu J vérifiée avec une certaine probabilité, par exemple 95%, dans des assemblages construits, et la valeur inférieure une valeur minimale obtenue avec la même probabilité. Cette variante permet de s'approcher de la situation où une seule paire tube guide/crayon de contrôle présente le jeu J minimal, où la contrainte maximale $\sigma_{\theta\text{MAX}}$ serait atteinte, et où toutes les autres paires tube guide/crayon de contrôle présentent le jeu de passage J maximal, ce qui serait le cas le plus pénalisant.

La première partie du procédé pourra également, dans certaines variantes, prendre en compte des formes de tronçon inférieur 26 d'amortissement distinctes de celles décrites jusqu'à présent. Ainsi, ces tronçons inférieurs d'amortissement pourront présenter plusieurs parties successives de diamètres réduits éventuellement séparées par des parties de diamètres augmentés, généralement dénommées bulles. Dans certaines variantes, la première partie du procédé sera mise en œuvre avec des vis épaulées 28 non-percées par des alésages 29.

De manière plus générale encore, la première partie et la deuxième partie du procédé de conception décrit peuvent être employées indépendamment l'une de l'autre. Ainsi, on peut mettre en œuvre la deuxième partie concernant la conception du ressort 16 sans s'intéresser au calcul de la surpression ΔP et de la contrainte $\sigma_{\theta\text{MAX}}$.

REVENDICATIONS

1. Procédé de conception d'un assemblage (1) de combustible nucléaire destiné à être placé dans un réacteur nucléaire, l'assemblage comprenant plusieurs tubes guides (24), et une grappe de contrôle (4) comprenant elle-même plusieurs crayons de contrôle (10) et un support (11) de crayons de contrôle (10), les crayons de contrôle (10) et les tubes guides (24) s'étendant parallèlement à une direction longitudinale (L), chaque crayon de contrôle (10) étant reçu dans un tube guide (24) pour former des paires tubes guides/crayons de contrôle, chaque tube guide (24) comprenant un tronçon inférieur (26) d'amortissement comprenant au moins une partie de diamètre intérieur réduit destinée à contenir un fluide pour amortir la chute du crayon de contrôle (10) reçu dans ledit tube guide (24), la partie de diamètre intérieur réduit entourant le crayon de contrôle avec un jeu radial de passage (J) lors de la pénétration du crayon de contrôle (10) dans le tube guide (24), caractérisé en ce que le procédé comprend, pour au moins une paire tube guide/crayon de contrôle, les étapes de :

- a) détermination de la vitesse de chute du crayon de contrôle (10) à l'entrée du tronçon inférieur d'amortissement (26) lors de la chute de la grappe de contrôle (4) en cas d'arrêt du réacteur nucléaire,
- b) détermination, à partir de la vitesse de chute déterminée à l'étape a), de l'évolution de la vitesse de chute du crayon de contrôle (10) dans le tronçon inférieur d'amortissement,
- c) détermination, à partir de l'évolution de la vitesse déterminée à l'étape b), d'une surpression maximale (ΔP_{MAX}) créée dans le liquide contenu dans le tronçon inférieur d'amortissement (26), et
- d) détermination, à partir de la surpression maximale (ΔP_{MAX}) déterminée à l'étape c), d'une contrainte circonférentielle maximale ($\sigma_{\theta MAX}$) créée dans le tronçon inférieur (26) d'amortissement.

2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une étape de vérification, en utilisant la contrainte circonférentielle maximale ($\sigma_{\theta MAX}$) déterminée à l'étape d), qu'une contrainte maximale admissible par le tube guide (24) n'a pas été dépassée.

3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que l'étape de détermination b) est assurée en utilisant une valeur supérieure de jeu radial

de passage (J), et l'étape de détermination c) est assurée en utilisant une valeur inférieure de jeu radial de passage (J).

4. Procédé selon la revendication 3, caractérisé en ce que la valeur supérieure est une valeur maximale statistique du jeu de passage (J).

5 5. Procédé selon la revendication 3 ou 4, caractérisé en ce que la valeur inférieure est une valeur minimale statistique du jeu de passage (J).

6. Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que, le support (11) de la grappe de contrôle (4) comprenant un ressort hélicoïdal (16) d'amortissement de l'impact du support (11) contre un embout supérieur (7) de l'assemblage en cas de chute de la grappe de contrôle (4) lors d'un arrêt du réacteur nucléaire, le procédé comprend en outre les étapes de :

e) détermination de l'évolution de la vitesse de la grappe de contrôle (4) après impact du support (11) contre l'embout supérieur (7),

f) détermination, à partir de l'évolution de la vitesse déterminée à l'étape e), d'un effort longitudinal maximal (F_{MAX}) de compression du ressort (16),
15 et

g) détermination, à partir de l'effort maximal longitudinal de compression (F_{MAX}), d'au moins une contrainte maximale de cisaillement (τ_{MAX}) dans le ressort (16).

20 7. Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce qu'une contrainte maximale de cisaillement (τ_{MAX}) est une contrainte de cisaillement le long de la fibre neutre (FN) du ressort (16).

8. Procédé selon la revendication 6 ou 7, caractérisé en ce qu'une contrainte maximale de cisaillement est une contrainte de cisaillement le long de la fibre (F2) du ressort (16) la plus proche de son axe central longitudinal (A).
25

9. Procédé selon l'une des revendications 6 à 8, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une étape de vérification, en utilisant une contrainte maximale de cisaillement déterminée à l'étape g), qu'une contrainte maximale admissible par le ressort (16) n'a pas été dépassée.

30 10. Système de conception d'un assemblage de combustible nucléaire, caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de mise en œuvre des étapes d'un procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes.

11. Système selon la revendication 10, caractérisé en ce qu'il comprend un ordinateur (34) et des moyens (36) de stockage dans lesquels est

stocké au moins un programme comprenant des instructions pour l'exécution d'étapes du procédé de conception d'un assemblage de combustible nucléaire.

12. Programme d'ordinateur comprenant des instructions pour l'exécution des étapes d'un procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 9.

13. Support utilisable dans un ordinateur et sur lequel est enregistré un programme selon la revendication 12.

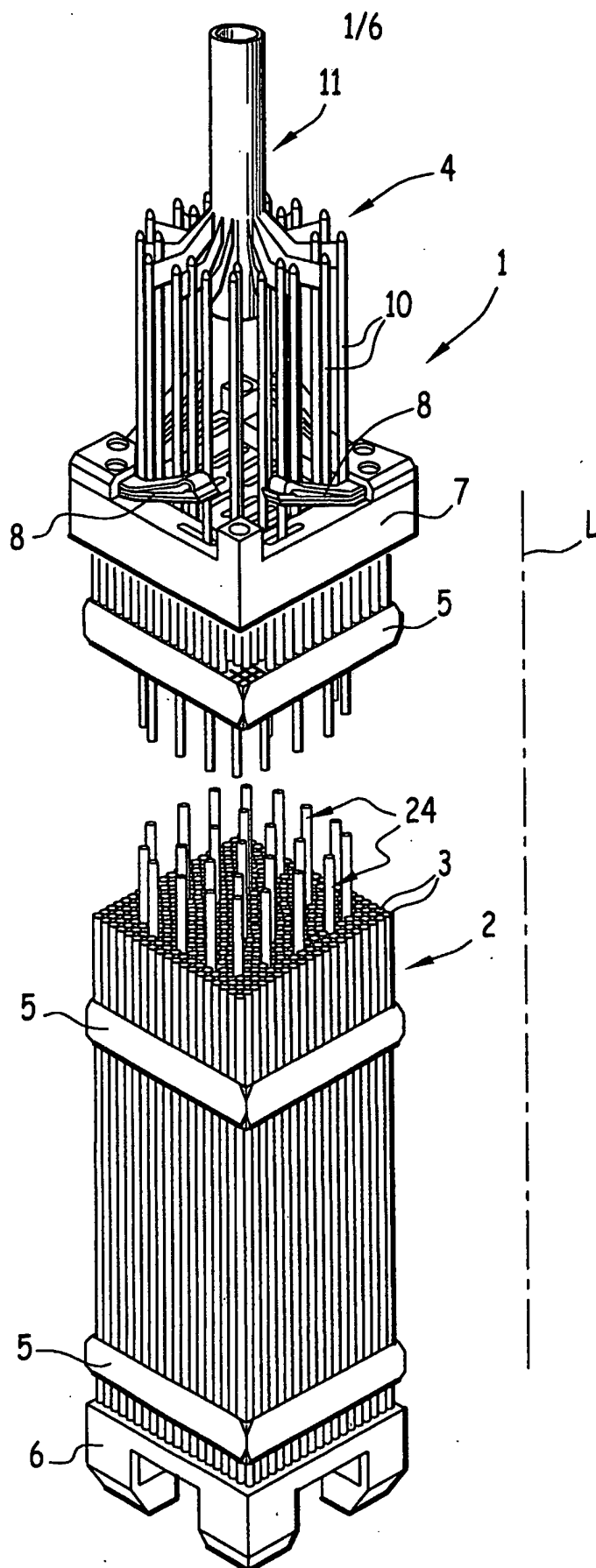
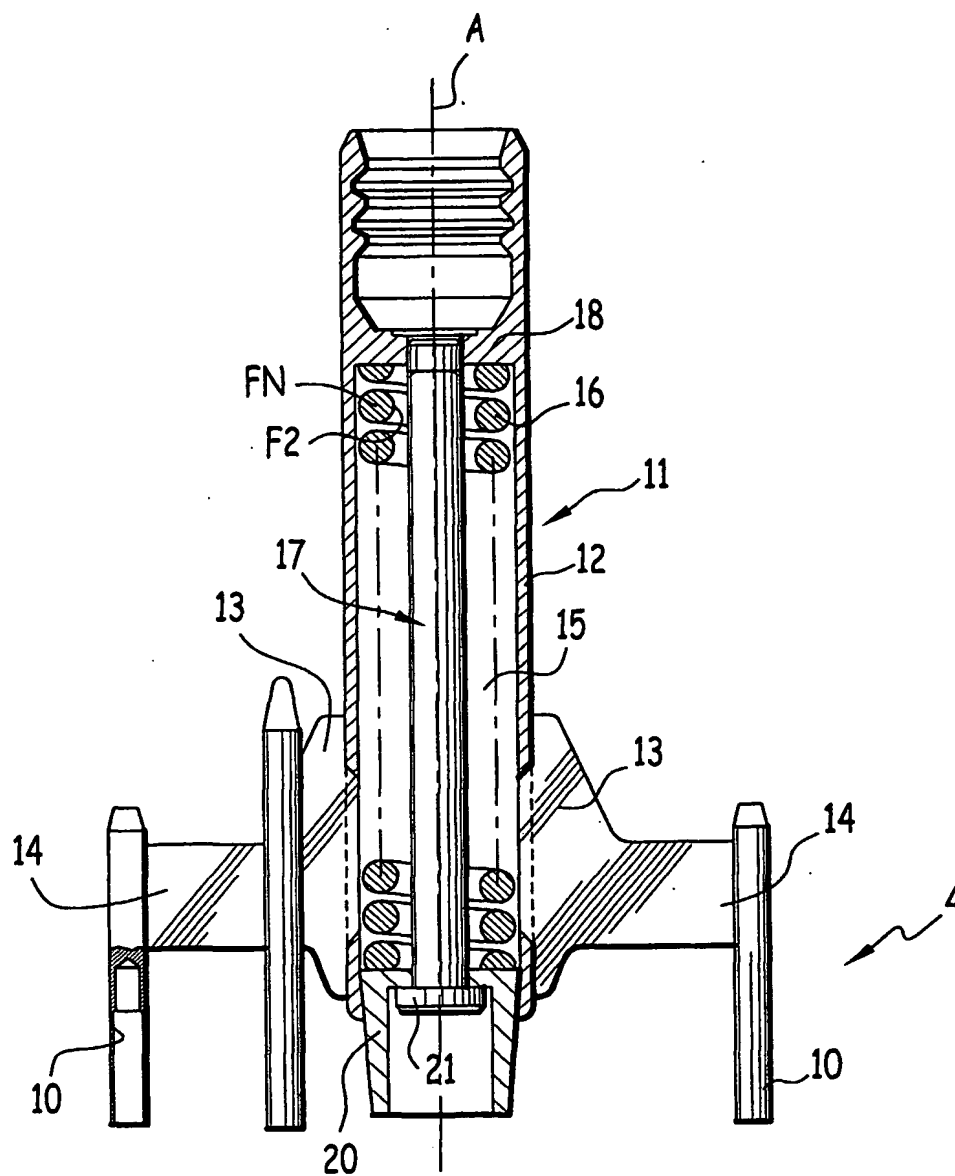
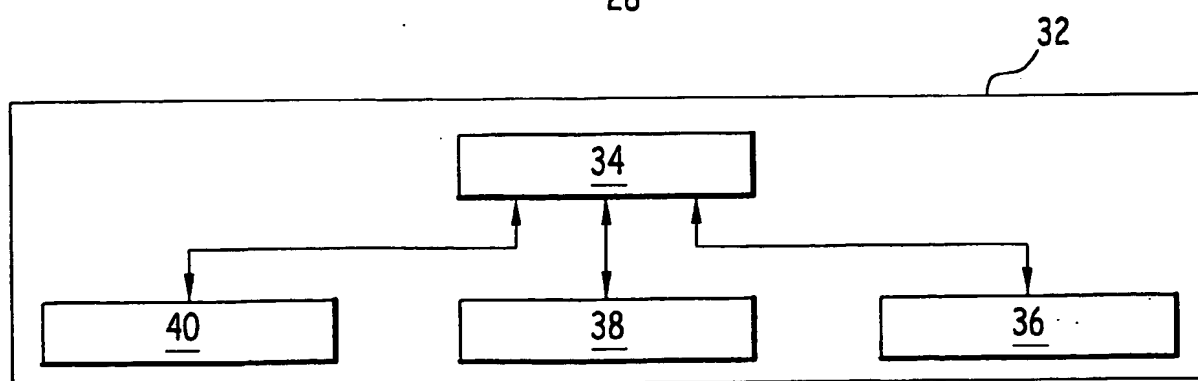
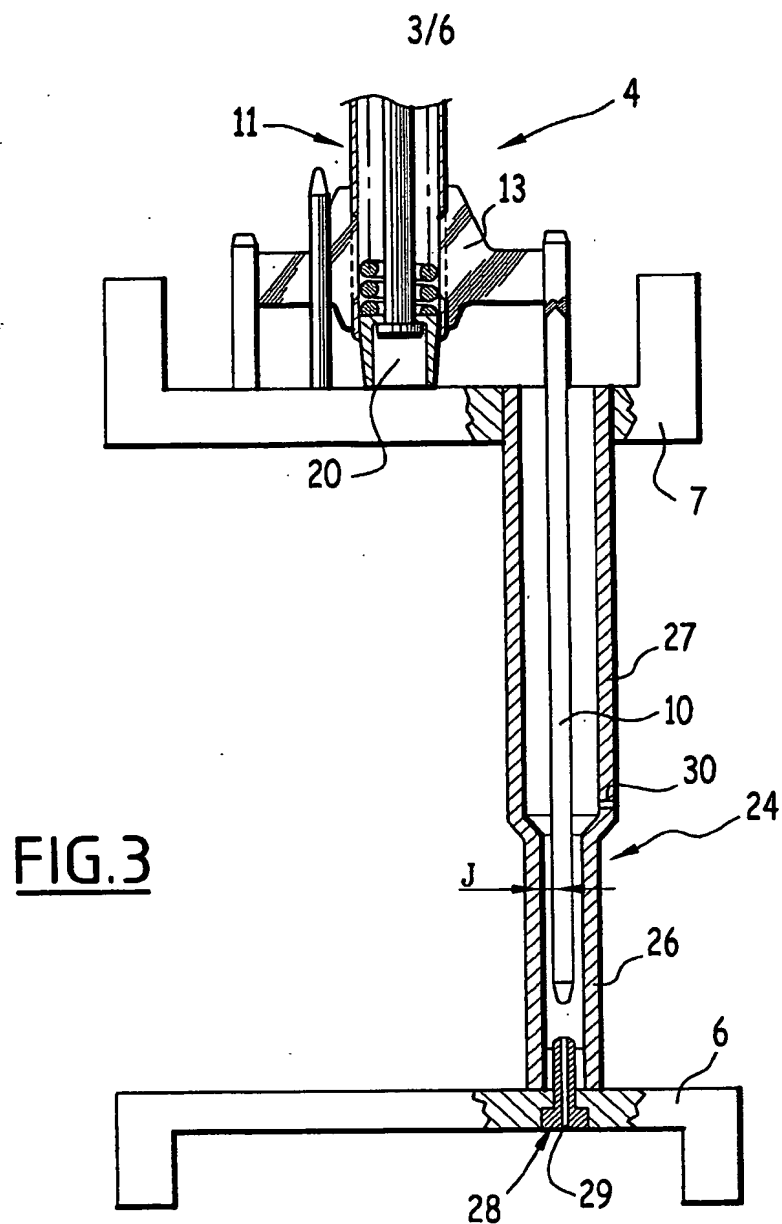


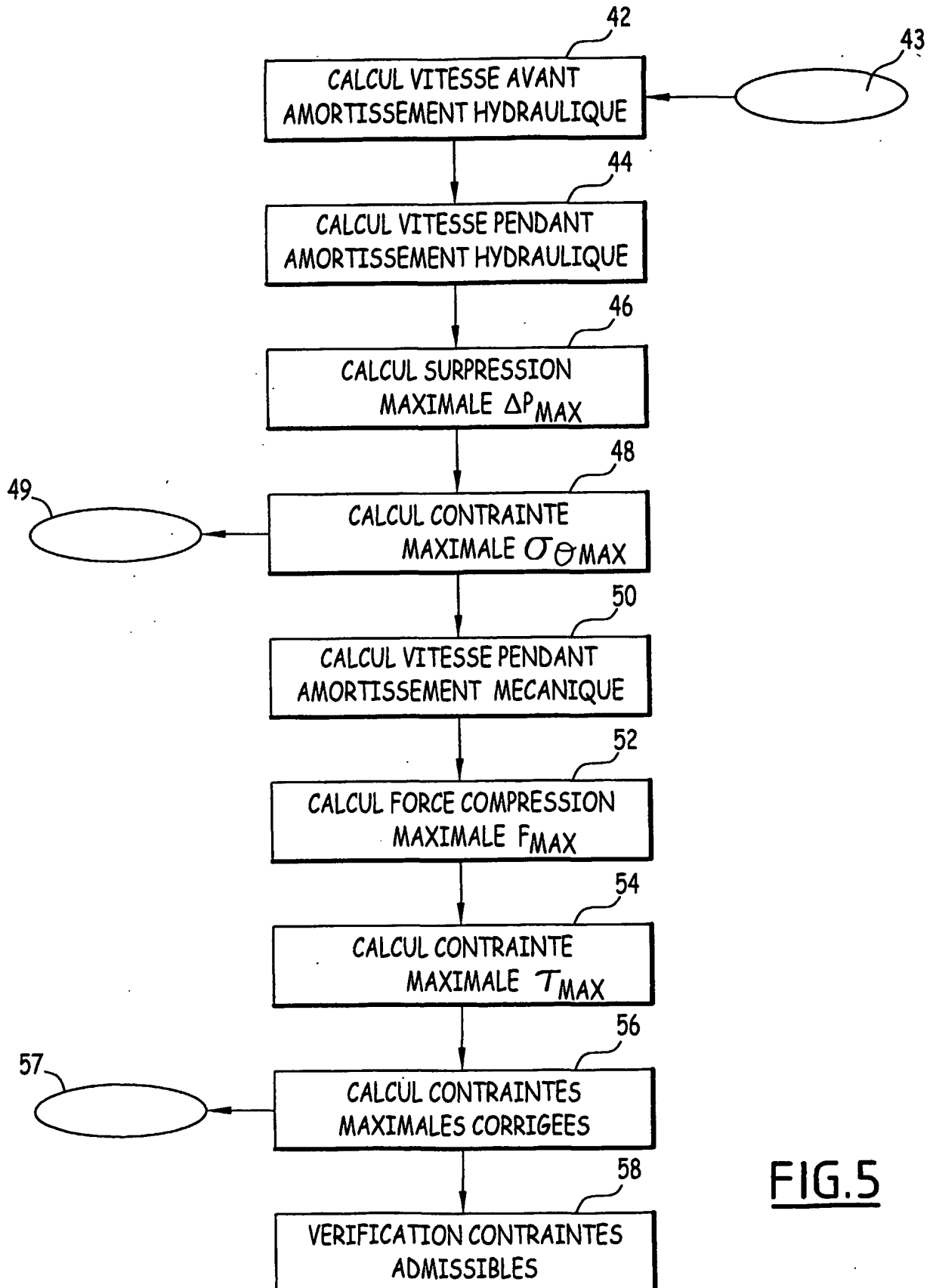
FIG.1

2/6

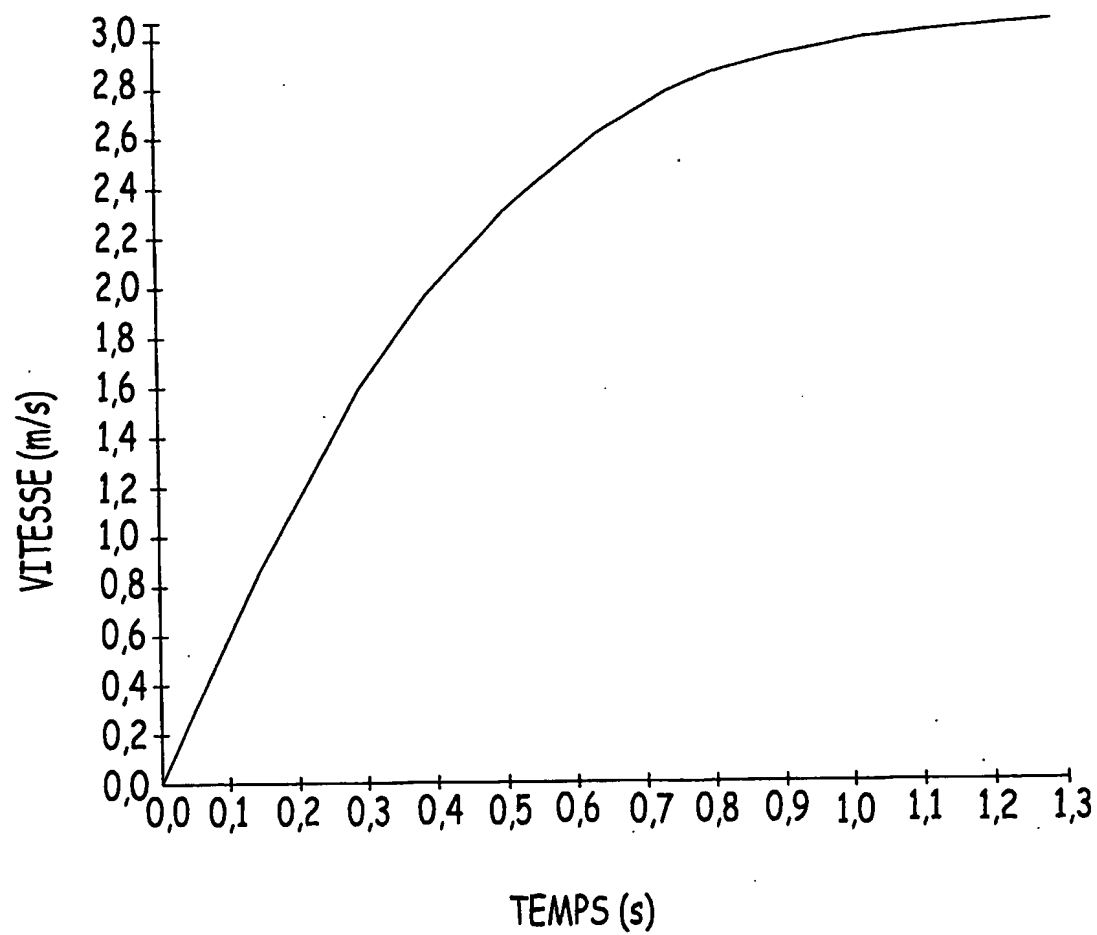
FIG.2



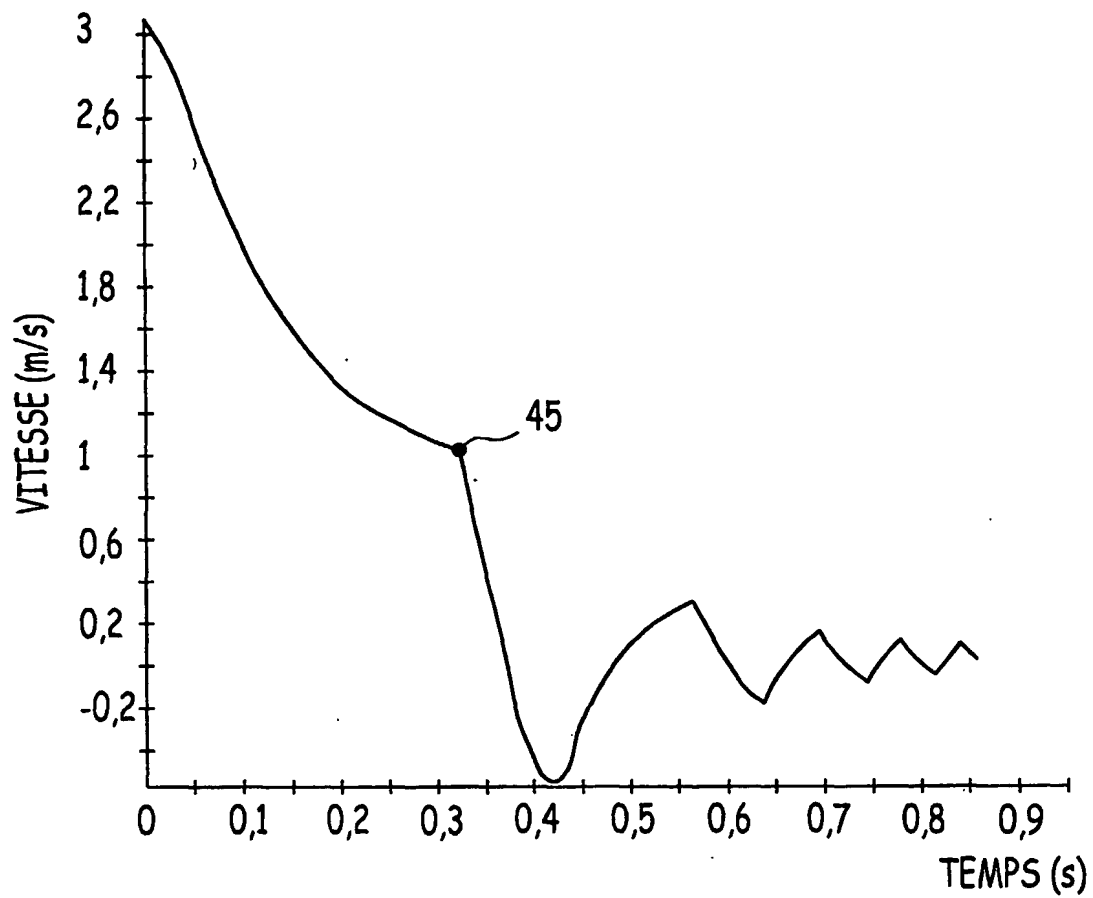
4/6

FIG.5

5/6

FIG.6

6/6

FIG.7